

Raport Techniczny: Zaawansowana Inżynieria Materiałowa i Biotechnologiczna w Systemach Zielonej Infrastruktury Miejskiej "Sexy-Hexy"

Streszczenie Wykonawcze

Niniejszy raport stanowi kompleksową odpowiedź na zapotrzebowanie techniczne w zakresie optymalizacji modułowego systemu zielonych fasad "Sexy-Hexy", realizowanego w ramach hackathonu Best Hacking League.¹ Dokument koncentruje się na dwóch krytycznych filarach inżynierskich, zidentyfikowanych jako kluczowe dla powodzenia projektu: selekcji materiałów konstrukcyjnych przewyższających niezawodnością polilaktyd (PLA) oraz szczegółowej analizy biologicznej gatunków mchów *Bryum argenteum*, *Ceratodon purpureus* i *Hypnum cupressiforme*.

W toku analizy wykazano, że standardowe PLA, mimo biodegradowalności, nie spełnia wymogów eksploatacyjnych dla zewnętrznych instalacji miejskich ze względu na degradację hydrolityczną i niską odporność termiczną, co zagraża integralności systemu nawadniania grawitacyjnego.¹ Jako alternatywę zaproponowano materiały z grupy ASA (akrylonitryl-styren-akrylan) dla elementów konstrukcyjnych oraz rPETG (recyklingowany politereftalan etylenu z glikolem) dla komponentów transparentnych i hydraulicznych, co pozwala na zachowanie ekologicznego charakteru projektu przy jednoczesnym zapewnieniu wieloletniej trwałości.

Analiza biologiczna potwierdza zasadność użycia wytypowanych gatunków mchów w układzie strefowym, skorelowanym z rozmieszczeniem sensorów jakości powietrza (MQ-9, MQ-2) oraz parametrów środowiskowych.¹ Gatunek *Bryum argenteum* zidentyfikowano jako optymalny dla stref o wysokim nasłonecznieniu, *Ceratodon purpureus* jako bioindykator zanieczyszczeń przemysłowych, a *Hypnum cupressiforme* jako kluczowy element retencji pyłów zawieszonych i izolacji akustycznej. Integracja tych systemów z platformą Arduino Uno R3¹ została poddana walidacji pod kątem bilansu energetycznego i logiki sterowania, ze szczególnym

uwzględnieniem algorytmów bezpieczeństwa przeciwpożarowego.

1. Wstęp: Uwarunkowania Projektowe i Definicja Problemu

1.1. Kontekst Urbanistyczny i Wyzwania BHL

Współczesna urbanistyka stoi w obliczu bezprecedensowego kryzysu metabolicznego. Jak wskazują dokumenty referencyjne Best Hacking League, miasta zajmujące zaledwie 2% powierzchni lądowej odpowiadają za 70% globalnych emisji gazów cieplarnianych.¹ Skutkuje to zjawiskiem Miejskiej Wyspy Ciepła (UHI), degradacją jakości powietrza oraz drastycznym spadkiem bioróżnorodności. Projekt "Sexy-Hexy" adresuje te problemy poprzez propozycję skalowalnego, modułowego systemu heksagonalnych paneli, integrujących żywą tkankę biologiczną z zaawansowaną sensoryką IoT.¹

1.2. Identyfikacja Ryzyk Technologicznych

Analiza wstępnej dokumentacji projektowej¹ ujawnia krytyczne ryzyko związane z doбором materiałów. Zespół projektowy słusznie zauważa wątpliwość: "Biodegradable PLA -> need to check if this can survive being outside".¹ Odpowiedź na to pytanie jest fundamentalna dla spełnienia kryterium "Realizacja techniczna prototypu" (20 pkt) oraz "Praktyczność i użyteczność" (15 pkt).¹ Zastosowanie materiału, który ulegnie deformacji lub biodegradacji w trakcie eksploatacji, dyskwalifikuje projekt jako rozwiązanie o "potencjale wdrożenia".¹

Równie istotnym wyzwaniem jest dobór gatunkowy roślinności. Mchy (Bryophyta) są organizmami poikilohydrycznymi, co oznacza, że nie posiadają mechanizmów aktywnej regulacji gospodarki wodnej, a ich przetrwanie zależy od równowagi między warunkami mikroklimatycznymi a fizjologią konkretnego gatunku. Przypadkowy dobór gatunków może prowadzić do obumarcia instalacji ("Czy mech nie umrze?"¹), co negatywnie wpłynie na ocenę "Efektu ekologicznego".¹

1.3. Cel i Zakres Raportu

Niniejszy dokument ma na celu dostarczenie inżynierskich dowodów i rekomendacji w następujących obszarach:

1. **Inżynieria Polimerów:** Analiza porównawcza PLA z materiałami inżynierskimi (ASA, rPETG) pod kątem odporności na UV, hydrolizę i pełzanie materiałowe (creep).
 2. **Biotechnologia Stosowana:** Szczegółowa charakterystyka gatunków *Bryum argenteum*, *Ceratodon purpureus* i *Hypnum cupressiforme* w kontekście ich zdolności do fito-remediacji i tolerancji na stres miejski.
 3. **Integracja Cyber-Fizyczna:** Korelacja właściwości biologicznych z architekturą systemu wbudowanego opartego na Arduino Uno R3, sensorach z serii MQ oraz systemie nawadniania.
-

2. Inżynieria Materiałowa: Analiza Alternatyw dla PLA w Zastosowaniach Zewnętrznych

Wytwarzanie przyrostowe (FDM/FFF) komponentów dla infrastruktury zewnętrznej wymaga materiałów o specyficznych właściwościach fizykochemicznych. Standardowy Polilaktyd (PLA), choć promowany jako ekologiczny, posiada szereg wad dyskwalifikujących go z zastosowań w projekcie takim jak "Sexy-Hexy". Poniższa analiza dekomponuje mechanizmy degradacji PLA i proponuje rozwiązania alternatywne, łączące niezawodność z wymogami ekologicznymi.

2.1. Mechanizmy Degradacji PLA w Środowisku Miejskim

Polilaktyd jest poliestrem alifatycznym. Jego biodegradowalność, będąca zaletą w kontekście odpadów opakowaniowych, staje się wadą krytyczną w inżynierii budowlanej.

2.1.1. Hydroliza Estrów a Szczelność Układu Wodnego

System "Sexy-Hexy" opiera się na grawitacyjnym przepływie wody przez zintegrowane kanały wewnątrz heksagonów oraz zbiornikach retencyjnych.¹ PLA jest materiałem wysoce higroskopijnym. W stałym kontakcie z wodą (szczególnie deszczówką o lekko kwaśnym odczynie, typowym dla miast) zachodzi proces hydrolizy wiązań estrowych. Prowadzi to do spadku masy cząsteczkowej polimeru, co objawia się mikropęknięciami ścianek kanałów wodnych. W perspektywie 3-6 miesięcy grozi to rozszczelnieniem systemu i niekontrolowanym wyciekiem, co stoi w sprzeczności z wymogiem "Stabilności działania".¹

2.1.2. Degradacja Fotochemiczna (UV)

Promieniowanie ultrafioletowe (UV) jest bezwzględnie dla tworzyw sztucznych w zastosowaniach zewnętrznych. PLA jest transparentne dla promieniowania UV w zakresie 240-280 nm, ale absorbuje promieniowanie w zakresie UV-B, co prowadzi do fotodegradacji łańcuchów polimerowych (reakcje Norrish typu I i II).

- **Efekt makroskopowy:** Materiał staje się kruchy, traci elastyczność i żółknie. W przypadku heksagonów montowanych na elewacji, podmuchy wiatru mogą doprowadzić do pęknięcia zaczepów montażowych zdegradowanego UV heksagonu, stwarzając zagrożenie dla przechodniów.

2.1.3. Niska Odporność Termiczna (HDT)

Najpoważniejszą wadą PLA jest niska temperatura ugięcia pod obciążeniem (Heat Deflection Temperature - HDT), wynosząca zaledwie 55-60°C.

- **Scenariusz Awarii:** Ciemne heksagony (np. grafitowe, estetyczne) wystawione na letnie słońce mogą osiągnąć temperaturę powierzchniową rzędu 70°C. W tej temperaturze PLA przechodzi w stan wysokoelastyczny (powyżej zeszklenia Tg). Pod wpływem ciężaru mchu, wody i elektroniki (serwa, czujniki), moduł ulegnie trwałej deformacji plastycznej (pełzanie). To doprowadzi do zablokowania serwomechanizmów obracających panelem solarnym¹ i rozszczelnienia styków hydraulicznych.

2.2. ASA (Akrylonitryl-Styren-Akrylan): Inżynierski Standard

Niezawodności

Aby spełnić wymóg "niezawodności większej niż PLA" przy zachowaniu możliwości druku 3D, materiałem pierwszego wyboru jest ASA. Jest to terpolimer amorficzny, stanowiący ewolucyjne rozwinięcie ABS, pozbawiony jego głównej wady – braku odporności na UV.

2.2.1. Chemiczna Odporność na Warunki Atmosferyczne

W przeciwieństwie do ABS, który zawiera fazę butadienową (podatną na utlenianie i degradację UV – żółknięcie i pękanie), ASA wykorzystuje fazę kauczuku akrylowego. Wiązania chemiczne w akrylanach są wyjątkowo stabilne i odporne na działanie tlenu singletowego oraz promieniowania UV.

- **Implikacja dla Projektu:** Heksagony wykonane z ASA mogą być eksploatowane na zewnątrz przez okres 5-10 lat bez zauważalnej degradacji mechanicznej czy wizualnej. Gwarantuje to wysoką punktację w kategorii "Potencjał wdrożenia" ¹, gdyż system nie wymaga częstych napraw.

2.2.2. Stabilność Termiczna i Mechaniczna

ASA charakteryzuje się HDT na poziomie 95-100°C. Zapewnia to całkowity margines bezpieczeństwa nawet podczas ekstremalnych fal upałów w środowisku miejskim. Sztywność (Moduł Younga ~2300 MPa) jest wystarczająca do przenoszenia obciążeń statycznych wynikających z masy nasączonego wodą mchu i akumulatorów.

2.2.3. Aspekt Ekologiczny (Trwałość jako Ekologia)

Choć ASA jest tworzywem ropopochodnym, w analizie cyklu życia (LCA) dla zastosowań długoterminowych wypada korzystniej niż biodegradowalne PLA. Konieczność wymiany biodegradowalnych modułów co sezon generuje większy ślad węglowy (produkcja, transport, druk) niż jednorazowa produkcja trwałego modułu z ASA. Dodatkowo, ASA w pełni nadaje się do recyklingu mechanicznego.

2.3. rPETG (Recyklingowany PET-G): Ekologiczny Kompromis

Odpowiadając bezpośrednio na zapytanie o "ekologiczny materiał", należy wskazać rPETG (Glikolowany Politereftalan Etylenu pochodzący z recyklingu). Jest to materiał powstający często z przetworzonych butelek PET, co wpisuje się w nurt Gospodarki Obiegu Zamkniętego (Circular Economy).

2.3.1. Odporność Chemiczna i Wodoodporność

PETG jest jednym z najbardziej odpornych chemicznie polimerów dostępnych w druku 3D. Jest całkowicie niewrażliwy na wodę, co czyni go idealnym materiałem do druku elementów mających stały kontakt z cieczą:

- Zbiorniki na wodę ("Water storage" ¹).
- Kanały dystrybucyjne i złączki hydrauliczne.
- Osłony sensorów wilgotności gleby.

2.3.2. Właściwości Mechaniczne

PETG jest materiałem ciągliwym, o wysokiej udarności. W przeciwieństwie do kruchego PLA i sztywnego ASA, PETG nie pęka pod wpływem uderzeń (np. gradobicia), lecz ulega odkształceniu. Jest to pożądana cecha dla zewnętrznych powłok ochronnych.

2.3.3. Ograniczenia i Środki Zaradcze

Standardowy PETG ma niższą odporność na UV niż ASA (może żółknąć po czasie), ale wyższą niż PLA. Jego HDT wynosi ok. 70°C, co jest wartością graniczną, ale akceptowalną dla jasnych kolorów odbijających światło. Aby zmaksymalizować trwałość, zaleca się stosowanie filamentów rPETG domieszkowanych stabilizatorami UV (np. Carbon Fiber rPETG), co dodatkowo zwiększa sztywność konstrukcji.

Tabela 1: Porównanie Właściwości Materiałów dla Systemu "Sexy-Hexy"

Parametr Techniczny	PLA (Polilaktyd)	ASA (Akrylonitryl-Styren-Akrylan)	rPETG (Recyklingowany PET-G)	Bio-Poliamid (PA11 - Rilsan)
Typ Polimeru	Biodegradowalny poliester	Inżynieryjny terpolimer	Recyklingowany poliester	Bioplastik inżynieryjny
Pochodzenie	Biomasa (Skrobia)	Paliwa kopalne	Recykling (Post-consumer)	Biomasa (Olejrzynowy)
Odporność na UV	Krytycznie Niska (Degradacja)	Wybitna (Naturalna)	Średnia (Wymaga stabilizacji)	Dobra
Odporność Termiczna (HDT)	~55°C (Ryzyko awarii)	~95°C (Pełne bezpieczeństwo)	~70°C (Akceptowalna)	~150°C (Wybitna)
Interakcja z Wodą	Hydroliza (Rozpad)	Wodoodporny	Wybitna Wodoodporność	Higroskopijny (Pęcznieje)
Ekologia w Zastosowaniu	Niska (Krótki czas życia)	Średnia (Trwałość = Ekologia)	Wysoka (Obieg Zamknięty)	Wysoka (Bio + Trwałość)
Rekomendowane Użycie	Prototypowanie (tylko wnętrza)	Ramy konstrukcyjne, Solar Hex	Zbiorniki wody, Transparentne osłony	Elementy złączne, Trybysery

2.4. Rekomendacja Hybrydowa dla "Sexy-Hexy"

W celu optymalizacji kosztów, ekologii i niezawodności, rekomenduje się podejście hybrydowe:

1. **Struktura nośna i obudowy zewnętrzne (Common Hex, Solar Hex):** Wykonane z **ASA**. Zapewni to sztywność, odporność na słońce i estetykę na lata.
 2. **System wodny i elementy transparentne (Display Hex, LED Hex):** Wykonane z **rPETG**. Zapewni to szczelność, odporność chemiczną i wykorzystanie surowców wtórnych, co jest silnym argumentem dla jury w kategorii "Wpływ ekologiczny".
 3. **Elementy mechaniczne (Zębatki do serw, uchwyty paneli):** Opcjonalnie **Bio-Poliamid (PA11)** wzmacniany włóknem węglowym, jeśli budżet na to pozwala, dla demonstracji innowacyjności.
-

3. Analiza Briologiczna: Dobór Gatunków i Funkcjonalizacja Sensorowa

Projekt zakłada użycie mchów jako aktywnego elementu biologicznego. Wybór gatunków nie może być przypadkowy. Analiza wskazanych w zapytaniu gatunków: *Bryum argenteum*, *Ceratodon purpureus* i *Hypnum cupressiforme* ujawnia ich unikalne adaptacje, które można bezpośrednio skorelować z architekturą sensorową systemu "Sexy-Hexy".

3.1. Fizjologia Mchów w Kontekście Inżynierii Miejskiej

Mchy są roślinami poikilohydrycznymi (ektohydrycznymi). W przeciwieństwie do roślin naczyniowych, pobierają wodę i składniki odżywcze całą powierzchnią ciała (liśćmi), a nie przez system korzeniowy.

- **Implikacja dla Hardware:** Czujnik wilgotności gleby ("Soil Moisture Sensor" ¹⁾ w przypadku mchów nie mierzy wilgotności "gleby" w tradycyjnym sensie, lecz wilgotność substratu retencyjnego (np. geowłókniny, hydrożelu).
- **Implikacja dla Smogu:** Brak kutykuli (woskowej osłony) sprawia, że mchy działają jak gąbka na zanieczyszczenia powietrza. Metale ciężkie i pyły PM osiadają bezpośrednio na ścianach komórkowych, gdzie są wiązane (wymiana kationowa).

3.2. *Bryum argenteum* (Prątnik Srebrzysty): Specjalista od Ekstremów

Gatunek ten jest kosmopolitycznym mchem synantropijnym, powszechnie występującym w szczelinach chodników, co dowodzi jego odporności na deptanie i stres miejski.

- **Adaptacja Morfologiczna:** Nazwa "srebrzysty" pochodzi od końcówek liści, które są pozbawione chlorofilu. Ta martwa, szklista tkanka działa jak naturalne zwierciadło, odbijając nadmiar promieniowania słonecznego.
 - *Zastosowanie w Sexy-Hexy:* Jest to idealny gatunek do obsadzenia najwyższych rzędów heksagonów ("Solar Panel Hex" i bezpośrednie sąsiedztwo), gdzie ekspozycja na słońce i ryzyko wysuszenia są największe.
- **Tolerancja na Suszę:** *B. argenteum* wykazuje ekstremalną tolerancję na desykację. Może przetrwać w stanie całkowitego wysuszenia przez wiele tygodni, a po nawodnieniu przez system "Sexy-Hexy" regeneruje się w ciągu kilku godzin.
- **Korelacja Sensorowa:** Jego obecność zmniejsza presję na system nawadniania. Algorytm sterujący dla strefy z *Bryum* może rzadziej otwierać zawory, oszczędzając wodę w zbiorniku.

3.3. *Ceratodon purpureus* (Ząbribek Purpurowy): Bioindykator i "Fire Moss"

Jest to gatunek pionierski, często kolonizujący gleby zanieczyszczone, kwaśne oraz tereny po pożarach (stąd angielska nazwa "Fire Moss").

- **Odporność na Zanieczyszczenia:** Badania wskazują na wysoką tolerancję tego gatunku na tlenki azotu i siarki. Jest on w stanie akumulować znaczne ilości toksyn bez obumierania.
 - *Zastosowanie w Sexy-Hexy:* Powinien być lokowany w heksagonach na wysokości ciągów komunikacyjnych (ulic), gdzie stężenie spalin jest najwyższe.
- **Synergia z Sensorem MQ-2 i Flame Sensor:** Z racji bycia gatunkiem kolonizującym pogorzeliska, *C. purpureus* posiada ewolucyjne mechanizmy szybkiej regeneracji po stresie termicznym. W przypadku zadziałania procedury awaryjnej (wykrycie ognia przez "Flame sensor" i zalanie instalacji wodą ¹), ten gatunek ma największe szanse na przetrwanie i odbudowę kolonii, co czyni system bardziej "resilient" (odpornym).
- **Estetyka:** W fazie wytwarzania sporofitów, łodyżki przybierają intensywny purpurowy kolor, co podnosi walory wizualne instalacji.

3.4. *Hypnum cupressiforme* (Rokitnik Cyprysowaty): Filtrator Powietrza

Jest to mech pleurokarpowy (płożący), tworzący gęste, zbite maty przypominające dywan.

- **Mechanika Wyłapywania Pyłów (PM):** Dzięki dużej powierzchni właściwej i gęstej strukturze, *H. cupressiforme* działa jak filtr mechaniczny i elektrostatyczny dla pyłów zawieszonych (PM2.5, PM10). Cząsteczki smogu są fizycznie uwięzione między listkami.
 - *Zastosowanie w Sexy-Hexy:* Optymalny dla strefy środkowej i dolnej ("Common Hex", "LED Hex"), gdzie wilgotność jest wyższa (spływ grawitacyjny wody), a prędkość przepływu powietrza mniejsza, co sprzyja sedimentacji pyłów.
- **Izolacja Akustyczna:** Gruba warstwa darni tego mchu posiada wysoki współczynnik pochłaniania dźwięku. Koreluje to bezpośrednio z odczytami z "Sound sensor".¹ Zainstalowanie *Hypnum* na dużej powierzchni pozwoli na wykazanie mierzalnej redukcji hałasu (dB) w pobliżu instalacji.

3.5. Strategia Syne-Ekologiczna (Mozaikowa)

Zamiast monokultury, rekomenduje się w raporcie zastosowanie układu strefowego, naśladującego naturalną sukcesję.

Tabela 2: Rozmieszczenie Gatunków w Systemie Modułowym

Strefa Modułu	Gatunek Mchu	Funkcja Dominująca	Powiązany Sensor/Aktuator	Uzasadnienie
Góra (Solar Hex)	<i>Bryum argenteum</i>	Odbijanie światła (Albedo), Tolerancja suszy	Fotorezystor, Servo Solarne	Najwyższa ekspozycja na UV i temperaturę. Gatunek chroni system przed przegrzaniem.

Środek (Command/Display)	<i>Ceratodon purpureus</i>	Bioindykacja spalin, Estetyka (Kolor)	MQ-9 (CO), MQ-2 (LPG/Smoke)	Strefa "oczna" dla przechodniów. Gatunek odporny na spaliny z ulicy.
Dół (Common/LED)	<i>Hypnum cupressiforme</i>	Retencja wody, Filtracja PM, Wyciszanie	Mikrofon (Sound), Soil Moisture	Strefa cienia i wilgoci (woda spływa w dół). Najlepsze warunki dla mchów dywanowych.

4. Architektura Systemu Hardware i Integracja Cyber-Fizyczna

Dokumentacja "Future Plan" ¹ oraz "Sexy-Hexy" ¹ wymienia szereg komponentów elektronicznych. Kluczem do sukcesu jest nie tylko ich podłączenie, ale stworzenie logicznego systemu sterowania, który reaguje na potrzeby biologiczne opisanych wyżej gatunków.

4.1. Analiza Platformy Sterującej: Arduino Uno R3

Wybór Arduino Uno R3 (mikrokontroler ATmega328P) jest standardem w prototypowaniu, jednak w kontekście tego projektu posiada ograniczenia.

- **Ograniczenia I/O:** Liczba czujników (MQ9, MQ2, DHT11, Wilgotność, Dźwięk, Światło, Płomień, Poziom cieczy) oraz aktuatorów (Serwo x2, Ekran OLED, Pompa/Zawór) przekracza liczbę dostępnych pinów cyfrowych i analogowych w standardowej konfiguracji.
- **Rekomendacja:** Należy zastosować ekspandery portów (np. PCF8574 na magistrali I2C) dla obsługi ekranu i mniej krytycznych sygnałów cyfrowych, lub multipleksery analogowe (np. CD74HC4067) dla czujników. Alternatywnie, migracja do ESP32 zapewniłaby wbudowaną łączność Bluetooth/WiFi (wymaganą w ¹), eliminując osobny moduł i

upraszczając architekturę.

4.2. Sensoryka: Fizyka Pomiaru i Wiarygodność Danych

4.2.1. Soil Moisture Sensor: Rezystancyjny vs Pojemnościowy

Dokumentacja wspomina "Soil Moisture Sensor".

- **Ryzyko:** Tanie czujniki rezystancyjne (z widełkami) ulegają szybkiej korozji elektrolitycznej w wilgotnym środowisku mchu. Ich żywotność to zaledwie kilka tygodni.
- **Wymóg Niezawodności:** Zgodnie z postulatem "bardziej niezawodny niż PLA", należy bezwzględnie zastosować **czujniki pojemnościowe (Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 lub analogiczne)**. Są one odizolowane od środowiska (pomiar przez zmianę dielektryka) i nie korodują, co zapewnia stabilny odczyt przez lata. Jest to kluczowe dla sterowania nawadnianiem *Hypnum cupressiforme*, który jest wrażliwy na przesuszenie.

4.2.2. Sensory Gazów: MQ-9 i MQ-2

Sensory serii MQ (Metal Oxide Semiconductor) wymagają grzałki do działania, co zużywa znaczną ilość energii (ok. 800mW na czujnik).

- **MQ-9 (CO/Gazy palne):** Wykrywa tlenek węgla, główny składnik spalin samochodowych. Jego obecność uzasadnia tezę o "Traffic Monitor".¹
- **MQ-2 (Dym/LPG):** Służy do detekcji smogu (jako aproksymacja przez węglowodory i dym) oraz pożaru.
- **Strategia Energetyczna:** Aby nie drenować akumulatorów ładowanych z paneli solarnych, czujniki te nie powinny działać w trybie ciągłym. Zaleca się cykliczne włączanie grzałki (np. 1 minuta grzania, 10 sekund pomiaru co 15 minut).

4.2.3. Mikrofon i Analiza Dźwięku

"Czujnik hałasu" ¹ powinien być nie tylko detektorem przekroczenia progu (typu binarny sygnał

HIGH/LOW), ale analogowym miernikiem natężenia dźwięku (z wyjściem Envelope). Pozwoli to na logowanie średniego poziomu decybeli (dB) w czasie i wykazanie korelacji między grubością warstwy mchu a tłumieniem hałasu.

4.3. System Nawadniania i Logika Sterowania (Algorytmy)

Projekt zakłada system grawitacyjny zasilany deszczówką ("gutters of the building feed into this" ¹).

4.3.1. Wyzwanie Hydrauliczne

Woda z rynien niesie zanieczyszczenia (liście, piach), które mogą zatkać elektrozawory i cienkie kanały w heksagonach z rPETG.

- **Rozwiązanie:** W module "Water Storage" należy zaprojektować osadnik grawitacyjny oraz filtr siatkowy (możliwy do wydruku 3D).

4.3.2. Algorytm "Smart Moss"

Sterownik Arduino musi realizować logikę rozmytą, a nie tylko progową:

1. **Tryb Standardowy:** Jeśli Soil_Moisture < 40% ORAZ Water_Level > 10% -> Otwórz zawór na 5 sekund (nawadnianie pulsacyjne, aby woda zdążyła wsiąknąć w *Hypnum* i nie spłynęła bezużytecznie).
2. **Tryb Oszczędny (Susza):** Jeśli Water_Level < 10% -> Podlewaj tylko krytycznie (np. przy wilgotności < 20%), licząc na przetrwanie *Bryum argenteum* (które znosi suszę) i poświęcając witalność *Hypnum*.
3. **Tryb Awaryjny (Pożar):** Jeśli Flame_Sensor == DETECTED LUB MQ2_Smoke > Threshold_High -> Otwórz zawór permanentnie ("dump the whole water reservoir" ¹). Jest to funkcja bezpieczeństwa chroniąca elewację budynku.

5. Analiza Wpływu Ekologicznego i Opłacalności (ROI)

Zgodnie z kryteriami oceny BHL, ten segment stanowi 40% wagi oceny.¹ Należy przedstawić dane w sposób ilościowy, a nie tylko jakościowy.

5.1. Redukcja Efektu Miejskiej Wyspy Ciepła (UHI)

Beton i cegła posiadają wysoką pojemność cieplną i niskie albedo, co prowadzi do nagrzewania się miast.

- **Mechanizm:** Panel "Sexy-Hexy" działa dwutorowo:
 1. **Cieniowanie:** Fizyczna bariera chroni ścianę przed bezpośrednim nasłonecznieniem.
 2. **Ewapotranspiracja:** Woda parująca z powierzchni mchów pobiera ciepło utajone parowania z otoczenia, aktywnie chłodząc powietrze wokół panelu.
- **Wskaźnik:** Badania wykazują, że zielone ściany mogą obniżyć temperaturę powierzchni elewacji nawet o 10-20°C w słoneczny dzień.
- **ROI dla Inwestora:** Mniejsza temperatura ściany = mniejsze zapotrzebowanie na energię do klimatyzacji wewnątrz budynku w okresie letnim. Jest to mierzalna oszczędność finansowa.

5.2. Oczyszczanie Powietrza i Sekwestracja Węgla

- **Sekwestracja CO₂:** 1 metr kwadratowy aktywnego mchu potrafi asymilować tyle dwutlenku węgla co niewielkie drzewo, nie zajmując przy tym cennej przestrzeni gruntowej.
- **PM Capture:** Gatunek *Hypnum cupressiforme*, dzięki swojej elektrostatyce, wyłapuje pyły PM_{2.5} i PM₁₀. Pyły te są następnie spłukiwane przez deszcz do podłoża lub metabolizowane (w przypadku niektórych związków organicznych) przez florę bakteryjną żyjącą w symbiozie z mchem.
- **Dane z Sensorów:** System "Sexy-Hexy" dostarcza dowodów na to działanie poprzez porównanie odczytów z sensorów (np. spadek stężenia CO w pobliżu ściany w porównaniu do ulicy).

5.3. Retencja Wody (Mała Retencja)

System wpisuje się w koncepcję "Miasta Gąbki" (Sponge City). Zatrzymywanie wody opadowej w zbiornikach i biomasie mchu opóźnia jej spływ do kanalizacji burzowej, co zmniejsza ryzyko lokalnych podtopień (flash floods) podczas nawałnych deszczy. Wykorzystanie wody deszczowej do nawadniania systemu czyni go samowystarczalnym i nie obciąża miejskiej sieci wodociągowej.

5.4. Aspekt Społeczny i Psychologiczny

Dokumentacja wspomina: "green = happy bc science".¹ Jest to nawiązanie do hipotezy biofilii E.O. Wilsona.

- **Analiza:** Wprowadzenie zieleni do zabetonowanych centrów miast redukuje poziom stresu (kortyzolu) u mieszkańców. Ekran OLED ("Display Hex") wyświetlający "uśmiechniętą buźkę" lub dane o czystości powietrza buduje interakcję społeczną i edukuje przechodniów, co zwiększa wartość nieruchomości.
-

6. Wnioski i Rekomendacje Wdrożeniowe

Przeprowadzona analiza techniczna i biologiczna pozwala na sformułowanie ostatecznych rekomendacji dla projektu "Sexy-Hexy", gwarantujących spełnienie wymogów konkursowych BHL oraz stworzenie funkcjonalnego produktu.

6.1. Podsumowanie Rekomendacji Materiałowych

Należy bezwzględnie odrzucić czyste PLA. Proces produkcji heksagonów powinien zostać przekierowany na:

- **ASA:** Dla wszystkich elementów konstrukcyjnych narażonych na słońce i obciążenia.
 - **rPETG:** Dla elementów transparentnych i mających kontakt z wodą.
- Użycie tych materiałów eliminuje ryzyko awarii strukturalnej i wpisuje się w narrację o trwałości jako najwyższej formie ekologii.

6.2. Podsumowanie Strategii Biologicznej

Zastosowanie monokultury jest błędem. Sukces zapewni mozaika gatunkowa:

- **Góra:** *Bryum argenteum* (tarcza słoneczna).
- **Środek:** *Ceratodon purpureus* (monitor zanieczyszczeń).
- **Dół:** *Hypnum cupressiforme* (filtr i gąbka).

6.3. Plan Rozwoju (Future Roadmap)

W fazie post-hackathonowej (kategoria "Potencjał rozwoju" ¹), zaleca się:

1. **Integracja AI:** Wykorzystanie danych z karty SD do trenowania modelu uczenia maszynowego, który będzie przewidywał zapotrzebowanie na wodę w oparciu o prognozę pogody, a nie tylko aktualne odczyty czujników.
2. **Energetyczna Autonomia:** Optymalizacja zużycia energii poprzez przejście mikrokontrolera w tryb "Deep Sleep" i wybudzanie tylko na czas pomiaru, co pozwoli na całkowite uniezależnienie się od sieci energetycznej, nawet w pochmurne dni.

Realizacja powyższych wytycznych przekształca projekt "Sexy-Hexy" z amatorskiego prototypu w zaawansowane inżynieryjnie rozwiązanie problemów współczesnych miast, gotowe do prezentacji przed najbardziej wymagającym jury.

Tabela 3: Zgodność Projektu z Kryteriami Oceny BHL

1

Kryterium	Waga	Element Realizujący w Projekcie (Po Wdrożeniu Rekomendacji)
Realizacja techniczna	20 pkt	Zastąpienie PLA materiałem ASA/rPETG. Stabilny kod Arduino z obsługą błędów. Użycie czujników

		pojemnościowych.
Wpływ ekologiczny	40 pkt	Ilościowe dane o retencji wody i redukcji CO2. Użycie materiałów z recyklingu. Gatunkowy dobór mchów pod kątem smogu.
Innowacyjność	15 pkt	System hybrydowy (biologia + IoT). Algorytm przeciwpożarowy wykorzystujący wodę z systemu nawadniania.
Praktyczność	15 pkt	Modułowość (łatwa wymiana uszkodzonego heksagonu). Samowystarczalność wodna (deszczówka) i energetyczna (solar).
Potencjał rozwoju	10 pkt	Skalowalność na całe fasady. Możliwość integracji z systemami Smart City poprzez Bluetooth/IoT.

Cytowane prace

1. 11.BHL ZADANIE HARDWARE.pdf